

陆面水文—气候耦合模拟研究进展

占车生¹, 宁理科², 邹 靖³, 韩 建^{1,4}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;
2. 清华大学地球系统科学系 地球系统数值模拟教育部重点实验室, 北京 100084;
3. 山东省科学院海洋仪器仪表研究所, 青岛 266001; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 陆面水文过程是全球/区域气候模式十分重要而又十分薄弱的环节。本文通过科学文献计量法, 分析了陆面水文—气候耦合研究的发展状况及研究热点和趋势, 并进一步对研究中存在的问题和挑战进行综述和探讨。现有多数气候模式中的陆面模式主要基于一维垂向结构设计, 缺乏对流域尺度水文过程的精细描述, 尤其缺乏下垫面人类活动影响的描述。因此, 为了科学认识水文过程与气候变化的相互反馈作用机制, 大量研究主要通过耦合流域水文模型与气候模式, 研究不同时空尺度下水文过程变化的气候反馈效应。陆面过程模式中水文过程的改进和大尺度水文模型发展为陆面水文—气候耦合模拟奠定基础, 在此基础上, 陆面水文—气候耦合研究正从传统的单向耦合研究逐步发展为考虑气候—水文反馈的双向耦合研究。然而, 双向耦合研究远未成熟, 其问题集中表现为陆面水文—气候模型耦合过程如何匹配并提高系统稳定性、研制有效的尺度转换方案、完善参数化方案并评估参数不确定性、研制有效参数移植方法并提高模型适用性以及高分辨率甚至超分辨率模拟等方面, 逐步解决上述问题并提高模拟精度是未来水文—气候耦合模拟研究的重要发展方向。

关键词: 陆面水文; 气候模式; 水文—气候双向耦合; 水循环; 研究综述

DOI: 10.11821/dlxz201805009

1 引言

陆地水循环是地球系统内的重要过程之一。随着人类活动在全球气候变化过程的影响日益凸显, 洪水、干旱频率和历时发生变化的水文事件日益增多, “三生”用水和水电能源可用水资源量预估的不确定性也进一步增大, 区域气候变化与水文过程的相互影响、反馈过程已成为国际水科学的研究的前沿问题之一^[1-2]。正确认识气候变化与人类活动共同影响下的区域水文响应过程, 也是中国重大战略需求之一。《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006-2020年)》中指出, “大尺度水文循环对全球变化的响应以及全球变化对区域水资源的影响”是“全球变化与区域响应”基础研究中的重要研究内容之一。因此, 针对具体流域开展区域气候—陆面水文相互影响的模拟研究, 对于科学认识全球气候变化背景下陆地水循环时空演变规律, 评估气候变化和人类活动对水资源安全的影响, 保障社会经济可持续发展, 具有重要的科学意义与应用价值。

与全球模式相比, 区域气候模式拥有更高的分辨率和模拟精度。然而对于某一具体

收稿日期: 2017-06-12; 修订日期: 2018-03-17

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFA0603702); 国家自然科学基金项目(41571019, 41701023) [Foundation: National Key R&D Program of China, No.2017YFA0603702; National Natural Science Foundation of China, No.41571019, No.41701023]

作者简介: 占车生(1975-), 男, 湖北黄冈人, 研究员, 主要从事流域水循环模拟研究。E-mail: zhancs@igsnrr.ac.cn

通讯作者: 宁理科(1986-), 男, 河南漯河人, 博士后, 主要从事气候变化与水资源研究。E-mail: ninglk@igsnrr.ac.cn

流域而言,区域气候模式的尺度仍然过大,难以准确反映流域内的水文过程。传统水文模型大多基于高分辨率的下垫面信息进行二维或三维的水文过程模拟,其模拟精度远高于气候模式,但需要精细气候强迫的输入。长期以来,由于服务用途和关注对象的不同,水文模型与气候模式发展过程相互独立。但随着气候变化与流域水循环研究不断深入,将气候模式与水文模型结合,研究区域气候—陆面水文过程相互影响的需求越来越迫切。

自21世纪初以来,世界气候研究计划(WCRP)、国际地圈—生物圈计划(IGBP)、全球能量和水循环实验计划(GEWEX)等都将陆面水文—区域气候耦合模式研究作为其主要内容之一^[3]。如何在气候模式中建立既能有效描述水循环时空演变过程,又能对一定区域内的水文水资源进行定量评估的大尺度水循环模拟系统成为全球气候变化研究的热点和难点^[4-5]。本文首先通过科学计量分析水文—气候耦合研究的发展态势、研究热点及其在主要国家的分布,在综合评述陆面过程模式产汇流方案以及大尺度水循环模型发展的基础上,阐述陆面水文—气候的耦合模拟从单向耦合向双向耦合方向的发展趋势,提出水文—区域气候双向耦合存在的主要问题与挑战。

2 陆面水文—气候耦合模拟文献计量分析

2.1 水文—气候耦合模拟发展趋势

为探究水文—气候耦合研究的发展态势,首先在Web of ScienceTM数据库中对相关文献进行检索,检索策略为TS=((“climate model” OR “regional climate model” OR “land surface model” OR “land surface scheme*” OR “land surface parameterization*”) AND (“hydrology” OR “hydrolog* model” OR “hydrological cycle” OR “water cycle”)),并对文献类型进行筛选,选择研究论文和综述,共得到相关文献1617篇,其中研究论文1558篇,综述类59篇。

年发文量反映了学术界对水文—气候耦合研究的投入和兴趣,年被引频次则反映了学术界及社会公众对该研究主题的关注。从水文—气候耦合研究的年发文量和年引用量来看,学术界及公众对该研究主题的关注和兴趣逐渐增加(图1),并且基本可以分为3个阶段:①1996年以前,为该研究主题的萌芽阶段,该阶段内年发文量均在10篇以下,并且年被引频次在150次以下,为气候模式或陆面模式中水文模型的参数化与气候变化对水资源影响研究的初始阶段;②1996-2006年,为该研究主题的初步发展阶段,该阶段内年均发文量均在50篇以内,并且年被引频次在2000次以内,主要结合气候模

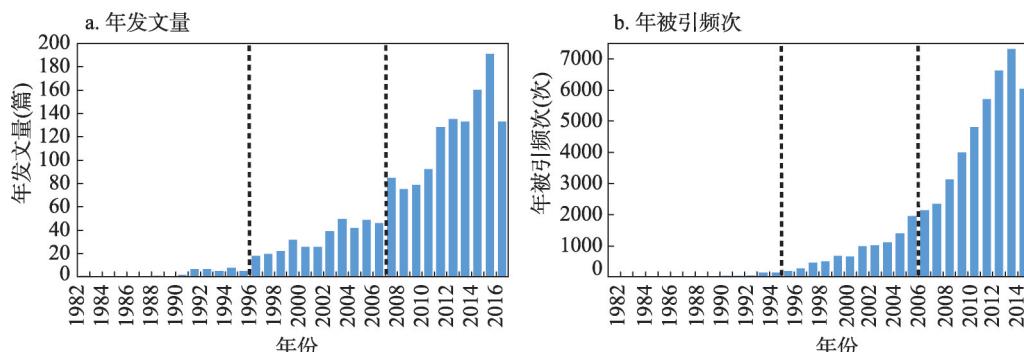


图1 年发文量及被引情况

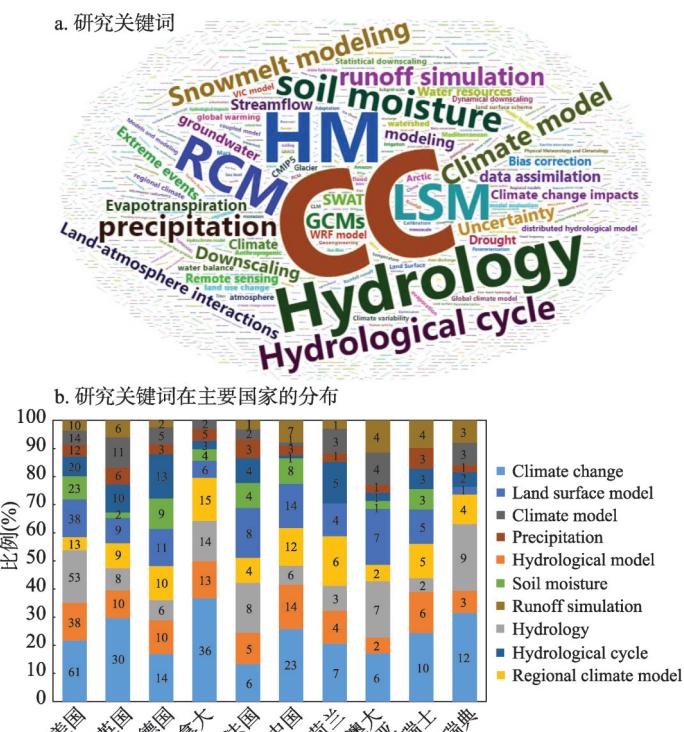
Fig. 1 Papers published and their citations by year

式、陆面模式以及水文模型研究气候变化下水资源、土壤水时空分布特征;③ 2007年以来,为该研究主题的深入与多样化发展阶段,该阶段年发文量和被引频次均急剧增加,说明该研究主题已成为学术界和社会关注的热点问题。另外,该阶段气候模式或陆面模式与水文模型的耦合越来越密切,同时,大尺度水文模型/全球水文模型得到了较大的发展,并且开展了不同研究对象的模式比较计划。

2.2 陆面水文—气候耦合研究热点及其在主要国家的分布

关键词作为科技论文检索的主要标识,能鲜明而直观地表述文献论述或表达的主题。对1617篇文献中关键词进行合并清理,共得到1762个不同的关键词。对关键词进行词频分析,可以得到关键词词云以及主要关键词在主要研究国家的分布(图2)。在关键词词云中,关键词的大小反映了关键词的出现的频次。从关键词词云可以看出(图2a),陆面水文—气候耦合研究领域多采用气候模式/区域气候模式或陆面模式结合水文模型,研究气候变化与水文循环之间的关系。该研究领域主要采用的技术手段遥感、数据同化、误差校正、降尺度(统计降尺度、动力降尺度)等,主要采用的模式或水文模型有GCMs、SWAT、WRF、VIC和CLM等,研究热点主要为气候变化、人类活动(含土地利用)对水文循环、水资源的影响,可以进一步分解为径流模拟、融雪/融冰径流模拟、土壤湿度变化、降水变化、蒸散发变化、地下水变化,陆面—大气交互等,并通过模式比较计划评估模式的不确定性。

对词频出现最高的前10个关键词进行统计分析,分析其在主要研究国家的分布情况(图2b)。图2b中数字表示该关键词的频次,每个关键词的长度代表该关键词在该国家相关研究的比重。从频次来看,美国相关研究中各个关键词出现的频次都高于其他国家,尤其是气候变化、水文模型、水文学原理、陆面模式领域,其土壤水、水文循环、气候模式的研究也处于超前位置。英国在气候变化、气候模式方面的研究相对其他国家具有较大的优势;德国各个关键词的分布相对均匀,其在陆面模式和水文模型方面具有较大的发展,加拿大的研究则主要集中在气候变化、水文模型、水文学原理以及区域气候模式方面;与其他国家相比,中国的气候变化、水文模型和区域气候模式研究也处于较为靠前的位置,但气候模式、水文循环的研究较为薄弱,需要加强。



注: 图a中CC: climate change; HM: hydrological model;

LSM: land surface model。

图2 水文—气候耦合研究关键词及其在主要国家的分布

Fig. 2 Keywords of atmosphere-hydrology simulations and their distribution in major countries

3 陆面过程模式改进和大尺度水文模型发展是陆面水文—气候耦合模拟的基础

3.1 陆面过程模式改进

在水文—气候耦合过程中，陆面模式是陆地水文与区域气候模式耦合的共同界面，如何更精确地模拟大尺度陆地水循环过程是陆地水文与区域气候耦合的重点。从简单的Bucket模型开始，陆面模式不断更新、修正自身陆面水文过程的描述^[6]。20世纪90年代发起的陆面参数化方案比较计划（PILPS）结果表明，引入卫星遥感资料并考虑碳循环过程的第三代陆面模式在水文过程模拟方面正逐步完善，基本能够用于长期气候与陆地水资源变化模拟，代表模型有Noah LSM（Noah Land-Surface Model）^[7]、CoLM（Common Land Model）^[8]等。其中，通用陆面模型CLM（Community Land Model）作为地球系统模型CESM（Community Earth System Model）的陆面部分，成为应用最广泛的陆面模型之一^[9-10]。以CLM为代表的陆面模型采用次网格设计，对土壤湿度、水热通量等方面模拟效果较好。然而，在产汇流过程机制方面，陆面模型大多采用一维单柱结构设计，产汇流过程的模拟精度明显差于流域水文模型。

表1汇总了一些常用陆面模式的产汇流方案。从表1可以看出，多数陆面模式的产汇流机制仍不完善，尤其缺乏考虑人类活动的影响，模型改进的空间很大。由于陆面模式大多采用一维单柱结构设计，模拟产流过程大多是流域整体对降水的响应，未能反映土

表1 常用陆面模式的产汇流方案对比

Tab. 1 Comparison of parameterization schemes of runoff generation and river routing process in land surface models

模式 名称	产流机制		汇流机制	是否考虑人类活动 影响方面的改进
	地表径流	地下径流		
BASE	超渗产流	重力排水	无	否
BATS	类似VIC蓄满产流	重力排水	Muskingum	很少，如Chen等 ^[15] 的工作
BUCK	蓄满产流	Bucket drainage	无	否
CLASS	超过地表蓄水能力产流	重力排水	线性水库和地貌单位线	否
IAP94	最上层蓄满后产流	不详	无	否
ISBA	类似VIC蓄满产流	重力排水	MODCOU汇流	否
MOSAIC	蓄满产流	考虑坡度作用的重力排水	无	否
PLACE	超渗产流	侧向流和重力排水	无	否
SSIB	蓄满产流	重力排水	TOPMODEL汇流	否
UKMO	超渗产流	重力排水	无	否
VIC-3L	三层VIC蓄满产流	非线性Arno base flow curve基流机制	单位线法和圣维南方程	很少，如Haddeland等 ^[16] 的工作
MATSIRO	TOPMODEL产流	侧向流和重力排水	TRIP	考虑水库调度、取用水等，Pokhrel ^[17] 等
LaD	蓄满产流	不详	无	否
JULES	超渗产流	重力排水	无	否
CLM	TOPMODEL产流	侧向流和重力排水	线性水库	很少，如Zou等 ^[18] 的工作

壤水分侧向运动及河流与地下水的相互作用，并且模拟的径流大多不再参与随后的垂向水量平衡计算（例如不考虑河水补给下渗与河面蒸发），造成陆面模型在模拟陆表径流时存在一定偏差，尤其在某些内陆河流域，陆面模型的径流模拟结果仍需要进一步改进^[11-13]。陆面模式对径流模拟的偏差将进一步影响土壤湿度，从而对气候模拟产生影响^[14]。

鉴于水文—气候双向反馈的重要性，一些研究者通过将水文模型中关于产流、下渗、蒸发等算法直接移植到陆面模式内以改善陆面模式的水文过程，尝试水文—气候双向耦合模拟。例如，Habets等将陆面模式ISBA（Interactions between Soil, Biosphere and Atmosphere）与一个大尺度水文模型耦合，更新了模式的产汇流方案，结果表明耦合模型在模拟日径流方面有所改善^[19]；Seuffert等将一个基于TOPMODEL机制的陆面水文模型TOPLATS（TOPMODEL-based Land Surface-Atmosphere Transfer Scheme）与中尺度天气模式Lokal Model实现耦合，模拟结果表明耦合模型在模拟能量通量与雨量方面有所改善，但在模拟边界层结构方面仍存在一定偏差^[20]；Zeng等将水文模型VXM（combination of the VIC and Xinanjiang Models）关于产流计算的算法代替陆面模型BATS（Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme）的径流部分，改善了BATS对下渗、产流过程的模拟^[21]。这些研究由于仅改动替换陆面模式内某一过程的算法，因而可能导致气候模式系统的不协调，在改善径流模拟的同时极易引起其他气候要素模拟效果变差。针对上述问题，一些研究者通过替换或改进气候模式内的整体陆地水文模块，以改进气候模式对水文过程的模拟。与单纯修改某一个方案算法相比，整体改进水文模块能够增强系统的稳定性。例如，Chen等基于MM5（the fifth-generation mesoscale model）大气模式，一个自主设计的陆面水文模型与一个融雪模型，建立了一个适用于幼发拉底—底格里斯两河流域的区域水文气候模式RegHCM-TE（Regional Hydroclimate Model for the Tigris-Euphrates），结果表明该模式能够较好地模拟区域降水与年径流^[22-23]。另外，还有一些研究将地下水模型替换到陆面模式以研究地下水^[24-25]和基流^[26]的变化。然而，随着陆面模式内水文过程的不断改进，针对气候模拟的大尺度陆面水文参数化方案不断涌现，这些以水文模型算法代替气候模式方案的研究热度逐渐降低^[27-28]。

3.2 大尺度水文模型的发展推动水文—气候耦合研究

为了适应全球气候变化研究，更精确地估算区域和全球水资源量，基于水文模型框架的大尺度水循环模型研发逐渐成为当前气候变化研究的重点方向之一^[29]，并且近几十年大尺度水循环模型得到了较大的发展^[30-31]。国内外研究者在分布式水文模型基础上，通过提高网格空间尺度，探求水循环模型从流域尺度向大洲尺度或全球尺度拓展的合理模式^[32-33]。起初，大尺度水循环模型大多为基于水量平衡的概念性分布式或半分布式模型，主要用来模拟大流域的径流过程或评价气候变化对水文情势的影响，表2列出了部分目前较为常用的全球水文模型，其中代表性模型包括Macro-PDM^[34]和PCR-GLOBWB^[35-36]等。这些模型基于气候数据输入对大流域的径流过程进行模拟计算，能够满足评估气候变化对大流域水循环影响的要求。然而，这些水循环模型通常侧重降雨径流的模拟和水分收支的计算，缺乏对能量平衡的考虑，无法完整描述陆—气界面的水气能量交换过程^[37]。

近年来，大尺度水循环模型通过添加能量过程、生态过程、人类活动、土地利用变化等过程不断完善模型的参数化过程，代表性模型如VIC（Variable Infiltration Capacity）模型^[39]、Hanasaki等建立的用于全球水资源评估的综合模型^[40]以及Ragab等建立的IHMS（Integrated Hydrological Modeling System）^[41]等。这些大尺度水循环模型参数化方案逐渐丰富，与陆面模式的差异逐渐减小，但其重点仍为水文过程模拟，在陆面生化过程模拟等方面仍有所欠缺，短期内难以代替陆面模式。另外，由于尺度的升高，这类大尺度水

表2 全球水文模型主要方案对比^[38]Tab. 2 Comparison of parameterization schemes of some global hydrological models^[38]

模型名称	气象数据输入	能量平衡	蒸发	径流方案	积雪方案	动态植被	CO ₂ 影响
DBH	P, T, W, Q, LW, SW, SP	是	能量平衡	超渗产流	能量平衡	否	常数
H08	R, S, T, W, Q, LW, SW, SP	是	Bulk formula	蓄满产流	能量平衡	否	否
LPJmL	P, T, LW _n , SW	否	Priestley-Taylor	蓄满产流	度日因子	是	是
Mac-PDM.09	P, T, W, Q, LW _n , SW	否	Penman-Monteith	蓄满产流	度日因子	否	否
MATSIRO	R, S, T, W, Q, LW, SW, SP	是	Bulk formula	超渗/蓄满产流	能量平衡	否	常数
MPI-HM	P, T, W, Q, LW _n , SW, SP	否	Penman-Monteith	蓄满产流	度日因子	否	否
PCR-GLOBWB	P, T	否	Hamon	蓄满产流/Beta 函数	度日因子	否	否
WaterGAP	P, T, LW _n , SW	否	Priestley-Taylor	Beta函数	度日因子	否	否
WBM	P, T	否	Hamon	蓄满产流	经验公式	否	否

注: P: 降水; R: 降水强度; S: 降雪强度; T: 温度; W: 风速; Q: 比湿度; LW: 长波辐射通量; LW_n: 净长波辐射通量; SW: 短波辐射通量; SP: 气压;

循环模型失去了水文模型的部分优势,大多用于月际、年际径流模拟或水资源研究;而对于精度较高的流域洪水模拟预测工作而言,目前研究者仍然以小尺度的流域水文模型为主要工具。因此,为了提高气候模式在流域水文过程方面的模拟精度,考虑气候—水文相互反馈影响,需要完善大尺度水循环模型物理过程,并优化耦合方法,实现陆地水文与区域气候间的双向反馈。

4 陆面水文—区域气候的耦合模拟逐步从单向耦合向双向耦合方向发展

自20世纪90年代以来,国内外大气水文学界加强了模式耦合研究,使气候模式与水文模型的优势得以结合,拓展气候模式在流域尺度的模拟能力^[42-43]。鉴于流域洪水模拟及气候—水资源变化研究的重要性,陆地水文—区域气候的耦合研究已成为IPCC技术报告中专门论述和强调研究的新方向^[2]。

传统的水文气候耦合研究大多集中在气候变化对流域水文过程的影响,采用方法多为单向耦合方法,即将气候模式输出的结果,如降水、气温等气象要素,通过降尺度方法直接作为水文模型的驱动,模拟蒸发、径流等水文要素。这种单向耦合方法操作简单,得到了广泛应用^[44-46]。然而,单向耦合方法由于缺乏流域水文要素变化对区域气候的进一步反馈,因而在一定程度上会影响流域水文过程的模拟精度。鉴于水文—气候双向反馈的重要性,传统的单向耦合方法正逐步向双向耦合发展。在双向耦合研究中,一些研究者将水文模型中关于产流、下渗、蒸发等算法直接移植到陆面模式内,以改善陆面模式的水文过程模拟。

通过替换或改进陆面模式内水文过程的研究工作能够改善陆面模式的模拟效果,但这种嵌入式耦合方法仍基于陆面模式的架构运行,难以体现水文模型在流域尺度上产汇流模拟过程的精度优势。为了兼顾气候模式的尺度与水文模型的流域水文模拟能力,一

些研究者通过全耦合方式实现气候模式与水文模型的双向耦合,两者协同编译运行并保持各自的独立性。耦合过程中,水文模型与气候模式通过尺度转换等方法将实现变量交换,气候模式内气候要素通过降尺度作为水文模型的驱动,而蒸发、径流等水文要素则通过升尺度反馈至气候模式的陆面模块内。这种全耦合方式能够保留气候模式与水文模型的优势,是未来气候—水文双向耦合研究的主要发展方向^[47-48]。

目前,陆面水文—气候全耦合研究尚未成熟,仍有诸多问题有待解决,并且在编译运行方面存在一定难度,因而代表性研究工作相对较少。即便如此,一些研究工作仍取得了实质性进展。例如,Wagner等将区域气候模式WRF与分布式水文模型HMS进行结合,发展了全耦合的中尺度水文—气候耦合模型,并在中国鄱阳湖流域进行应用和验证^[49]。Senatore等将区域气候模式WRF与具有汇流机制的WRF-Hydro进行耦合构建了陆面水文—气候全耦合模型,并在地中海中部进行了应用和验证^[50]。Larsen等将HIRHAM气候模式与MIKE SHE水文模型通过耦合器在丹麦斯凯恩河流域实现了水文—气候全耦合^[51]。在该研究中,为了保证气候模式与水文模型在Linux、Windows不同平台下的协同运行,Larsen等利用并行算法对MIKE SHE模型进行大幅修改,使其能够利用耦合器与气候模式进行数据交换,HIRHAM模式模拟的地表风速、气温、湿度、降水等变量通过双线性插值驱动MIKE SHE模型运行,而MIKE SHE模拟的潜热、感热通量则通过HIRHAM模式的陆面模块向大气反馈。该耦合模型既能够通过MIKE SHE输出流域尺度的径流模拟,也能够通过HIRHAM进行区域气候模拟,有效地保留了两者的优势。

另外,在Maxwell等、Shresta等的工作中,气候模式与三维地下水模型实现了双向耦合,并改善了气候模式在产流、土壤湿度等变量的模拟^[52-53]。这些工作保留了气候模式的陆表水文过程模块,并能够对三维地下水运动进行高精度模拟,但由于不涉及陆表水文过程的改进,此类“气候—地下水”双向耦合工作的耦合难度相对较低。

5 存在的主要问题与挑战

目前,陆面水文与区域气候双向耦合研究尚为薄弱,且具有极大的研究空间,以下几个问题亟待进一步研究与探讨。

5.1 模型匹配与适应性

水文模型与气候模式不同的运行平台为陆面水文—气候耦合研究增加工作难度。通常而言,水文模型多采用Windows系统下的图形界面操作,而气候模式采用Linux系统下的并行算法。操作平台的差异使水文模型与气候模式的数据交换存在较大难度,因此两者耦合可以参考Larsen等^[51]的做法,将水文模型代码进行并行化,并采用相应耦合器实现平台间的数据交换。Gregersen等曾研制了一种跨平台的耦合器工具OpenMI,能够实现Windows与Linux平台下的数据交换,为水文—气候耦合提供了一种软件途径^[54]。根据OpenMI软件的要求,对模型代码修改后能够实现多模型的跨平台协同运行与数据交换。另外,对水文模型进行平台移植,实现其在Linux系统下的编译运行也是实现气候模式与水文模型耦合的途径之一,但软件实现难度相对较大。

除了运行平台的不匹配,陆面水文—气候耦合模型强制修改陆面模型内的水循环要素可能引起模型整体的不协调。虽然双向全耦合方法的稳定性远优于修改模式内某一方的做法,但是陆面模式内的水量平衡重新配置将进一步影响能量平衡、植被生长等过程,容易引起整体模型的不匹配^[55-56]。因此,在开展双向耦合工作时,需要详细评估模型内水量平衡改变所引起的次生变化。

5.2 不同尺度的网格转换方法

在陆面水文—气候耦合过程中,由于气候模式与水文模型的分辨率存在较大差异,粗网格的气候模式数据需要通过降尺度处理作为水文模型的驱动强迫,而水文模型对蒸发、径流等要素的模拟结果则需要通过升尺度手段向气候模式反馈。其中,如何从粗网格至细网格的降尺度方法是目前的研究热点之一。从简单的数学插值、考虑地形等环境要素的插值至复杂的统计插值方法,不同插值方法均有其适用范围与限制,并不存在各方面均优于其他方法的插值方法^[57-58]。因此,如何根据研究区域进行尺度分割^[59]、遴选更为有效的尺度转换方法或适用范围更广泛的算法,减小次网格不均匀性所引起的模拟偏差,是未来水文—气候耦合研究中的发展方向之一。

5.3 模式参数化方案的改进及不确定性

完善模式内物理参数化过程,提高模型模拟精度,是陆地水文—区域气候耦合的模型研究的基础。虽然水文模型和气候模式已取得了长足的发展,但在与水循环相关的物理参数化方案改进方面,仍有极大的进步空间^[60-61]。例如,气候模式内土地覆盖、土地利用相对固定,大多未能考虑土地动态变化过程。目前,少数模式(如通用陆面模式CLM)引入了植被季节生长与植被年际演替过程^[62],但有关人类的土地开发过程参数化依旧难以模拟,目前仍在试验研究阶段;除了土地利用变化,对陆地水资源的开采、利用、调配活动也极大影响了水循环过程。人类活动与全球气候—水文过程的相互影响反馈已成为水科学的研究的前沿问题之一^[63-64]。如何参数化描述人类对陆地水资源的再分配过程,是陆面模式与水文模型未来共同改进的方向;另外,植被生化过程以及冻土、城市、湖泊等下垫面类型的参数化描述改进,也是模式发展的方向之一^[65-66]。

另外,气候模式与水文模型的参数化方案内存在大量经验参数,这些参数在实时传递与耦合模拟过程中存在不确定性,并在很大程度上影响着模拟效果^[67-68]。如何量化评估各参数可能引起的不确定性,并开展参数优化与数据同化技术研究,是减少模型参数不确定性途径之一^[69]。

5.4 参数移植与区域适用性

水文模型的参数移植问题是水文学的研究难点之一,水文—气候耦合模型的区域适用性是其亟需解决的关键问题。水文模型多采用统计算法描述各水文要素间的关系,其模拟效果很大程度依赖模型参数的率定。在更换研究流域后,水文模型需要大量观测数据重新进行参数率定。因此,水文—气候耦合模型通常仅针对特定流域进行模拟,更换研究区域需要繁重的参数率定与模型评估工作,使得耦合模型的区域适用性方面有所缺陷。

许多研究者提出并比较了多种参数移植方法,提高水文模型的适用性,但与降尺度方法研究相似,目前仍不存在适用范围广泛的高效移植方法^[70-71]。Oubeidillah等曾针对中国大陆建立了大尺度水文模型VIC的参数集,为水资源与气候变化研究做出了积极贡献^[72]。然而,对于其他小尺度水文模型而言,建立大陆或国家范围内的模型参数集仍然难以实现。

5.5 高分辨率模拟的挑战

为更加准确的解决全球变化下全球或区域水循环科学问题和应用需求,高分辨率甚至超分辨率(空间分辨率小于1 km)的陆面模式或水文模型与气候模式的耦合将是未来研究的重点方向^[59, 73-74]。超分辨率陆面模式或水文模型的构建不仅仅需要超级计算机的支持以提升模型的分辨率和计算能力,同时面临更高空间分辨率上水文过程、水文—气候交互作用等机理的挑战^[75]。因此,如何科学的刻画更高空间分辨率下植被、地形的下垫

面状况下地表水—地下水相互作用机理, 陆面—大气相互作用机理以及相应尺度下土壤湿度和蒸散发的时空分布信息是开展超级分辨率下模式构建的科学基础。少数学者正开展该方面的研究, Singh等研究了1 km分辨率地形和土壤对CLM模拟的影响, 并模拟对比了100 m分辨率下径流、下渗等要素和过程的变化^[76], 研究表明超级分辨率下水文过程的刻画极大影响模拟结果。同时, 建立适用于高分辨率模式的全球观测网络和遥感数据集, 将成为高分辨率陆面水文—气候全耦合研究的重要工作。

6 结语

由于气候模式对不同下垫面下的蒸发、产汇流机制等水文过程考虑较为粗糙, 使得气候模式对流域尺度的水文过程模拟精度较低。因此, 结合水文模型与气候模式优势的陆地水文—气候双向耦合模拟研究, 逐渐成为当前气候变化与水资源科学研究中心亟待突破的关键技术与研究热点。

在耦合过程中, 如何通过水文模型的高精度模拟改进陆面模式的水文过程, 是陆地水文—气候双向耦合的基础。长期以来, 气候模式通过单向耦合方法向水文模型提供气候强迫输入, 然而这种方法缺乏水文模型对气候的反馈, 正逐步被双向耦合方法所替代。双向耦合通过水文模型与气候模式的实时双向反馈, 模拟流域尺度的水文过程, 并根据水文模型结果对气候模式水循环要素进行修正。

目前, 陆地水文—区域气候双向耦合研究尚未成熟。虽然有少数工作实现了水文模型与气候模式的跨平台协同运行, 但耦合研究仍存在诸多亟待解决的问题, 如模型耦合后的匹配与协调、不同尺度转换、次网格物理过程方案改进及参数不确定性、参数移植方法及区域适用性以及高分辨率模拟等。如何解决上述难点, 提高双向耦合模型的稳定性、适用性与准确性, 是今后陆地水文—区域气候耦合研究的发展趋势。

鉴于陆面水文—区域气候双向耦合所有存在的问题, 未来水文—气候双向耦合研究将进一步研究不同时空尺度水文—大气相互作用与转换问题; 改进模式对动态土地利用、人类活动以及不同下垫面蒸散发、土壤水、地表和地下水等要素的参数化描述; 减少模型耦合过程的不匹配与不确定性; 优化模型参数并研究无资料地区的参数移植方法; 探索高分辨率甚至超分辨率下水文—气候耦合机理。

参考文献(References)

- [1] Bates B, Kundzewicz Z W, Wu S, et al. Climate Change and Water: Technical Paper vi: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Geneva: IPCC Secretariat, 2008.
- [2] IPCC. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2014.
- [3] Liang X, Wood E F, Lettenmaier D P, et al. The Project for Intercomparison of Land-surface Parameterization Schemes (PILPS) phase 2(c) Red-Arkansas River basin experiment: 2. Spatial and temporal analysis of energy fluxes. *Global and Planetary Change*, 1998, 19(1-4): 137-159.
- [4] Guo Shenglian, Liu Chunzhen. Large scale hydrological models and its coupling with atmospheric models. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1997, 7: 37-41. [郭生练, 刘春蓁. 大尺度水文模型及其与气候模型的联结耦合研究. 水利学报, 1997, 7: 37-41.]
- [5] Yong Bing, Ren Liliang, Chen Xi, et al. Development of a large-scale hydrological model TOPX and its coupling with regional integrated environment modeling system RIEMS. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(8): 1954-1965. [雍斌, 任立良, 陈喜, 等. 大尺度水文模型TOPX构建及其与区域环境系统集成模式RIEMS的耦合. 地球物理学报, 2009, 52(8): 1954-1965.]
- [6] Manabe S. Climate and the ocean circulation 1: I. The atmospheric circulation and the hydrology of the earth's surface. *Monthly Weather Review*, 1969, 97(11): 739-774.

- [7] Livneh B, Xia Y, Mitchell K E, et al. Noah LSM snow model diagnostics and enhancements. *Journal of Hydrometeorology*, 2010, 11(3): 721-738.
- [8] Dai Y, Zeng X, Dickinson R E, et al. The common land model. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2003, 84(8): 1013.
- [9] Decker M, Zeng X. Impact of modified Richards equation on global soil moisture simulation in the Community Land Model (CLM 3.5). *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2009, 1(5): 22.
- [10] Oleson K W, Lawrence D M, Gordon B, et al. Technical description of version 4.0 of the Community Land Model (CLM). Colorado: Boulder, 2008.
- [11] Sahoo A K, Dirmeyer P A, Houser P R, et al. A study of land surface processes using land surface models over the Little River Experimental Watershed, Georgia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, 113: D20102.
- [12] Li M, Ma Z, Lv M. Variability of modeled runoff over China and its links to climate change. *Climatic Change*, 2017, 144 (3): 433-445.
- [13] Ning L, Xia J, Zhan C, et al. Runoff of arid and semi-arid regions simulated and projected by CLM-DTVM and its multi-scale fluctuations as revealed by EEMD analysis. *Journal of Arid Land*, 2016, 8(4): 506-520.
- [14] Yang Chuanguo, Lin Zhaohui, Hao Zhenchun, et al. Review of coupling atmospheric and hydrologic models. *Advances in Earth Science*, 2007, 22(8): 810-817. [杨传国, 林朝晖, 郝振纯, 等. 大气水文模式耦合研究综述. 地球科学进展, 2007, 22(8): 810-817.]
- [15] Chen F, Xie Z. Effects of interbasin water transfer on regional climate: A case study of the Middle Route of the South-to-North Water Transfer Project in China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010, 115: D11112.
- [16] Haddeland I, Skaugen T, Lettenmaier D P. Anthropogenic impacts on continental surface water fluxes. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33: L08406.
- [17] Pokhrel Y, Hanasaki N, Koirala S, et al. Incorporating anthropogenic water regulation modules into a land surface model. *Journal of Hydrometeorology*, 2012, 13(1): 255-269.
- [18] Zou J, Xie Z, Yu Y, et al. Climatic responses to anthropogenic groundwater exploitation: A case study of the Haihe River Basin, Northern China. *Climate Dynamics*, 2014, 42(7/8): 2125-2145.
- [19] Habets F, Noilhan J, Golaz C, et al. The ISBA surface scheme in a macroscale hydrological model applied to the Hapex-Mobilhy area: Part II: Simulation of streamflows and annual water budget. *Journal of Hydrology*, 1999, 217(1): 97-118.
- [20] Seuffert G, Gross P, Simmer C, et al. The influence of hydrologic modeling on the predicted local weather: Two-way coupling of a mesoscale weather prediction model and a land surface hydrologic model. *Journal of Hydrometeorology*, 2002, 3(5): 505-523.
- [21] Zeng X, Ming Z, Bingkai S, et al. Simulations of a hydrological model as coupled to a regional climate model. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, 20(2): 227-236.
- [22] Chen Z Q R, Kavvas M L, Ohara N, et al. Coupled regional hydroclimate model and its application to the Tigris-Euphrates Basin. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2011, 16(12): 1059-1070.
- [23] Chen Z Q R, Kavvas M, Ohara N, et al. Impact of water resources utilization on the hydrology of Mesopotamian Marshlands. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2011, 16(12): 1083-1092.
- [24] Maxwell R M, Miller N L. Development of a coupled land surface and groundwater model. *Journal of Hydrometeorology*, 2005, 6(3): 233-247.
- [25] Kollet S J, Maxwell R M. Capturing the influence of groundwater dynamics on land surface processes using an integrated, distributed watershed model. *Water Resources Research*, 2008, 44: W02402.
- [26] Kollet S J, Maxwell R M. Demonstrating fractal scaling of baseflow residence time distributions using a fully-coupled groundwater and land surface model. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35: L07402.
- [27] Niu G Y, Yang Z L, Dickinson R E, et al. A simple TOPMODEL-based runoff parameterization (SIMTOP) for use in global climate models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2005, 110: D21106.
- [28] Vrettas M D, Fung I Y. Toward a new parameterization of hydraulic conductivity in climate models: Simulation of rapid groundwater fluctuations in Northern California. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2015, 7(4): 2105-2135.
- [29] Yong Bing, Zhang Wanchang, Liu Chuansheng. Advances in the coupling study of hydrological models and land-surface models. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(6): 961-970. [雍斌, 张万昌, 刘传胜. 水文模型与陆面模式耦合研究进展. 冰川冻土, 2006, 28(6): 961-970.]
- [30] Sood A, Smakhtin V. Global hydrological models: A review. *Hydrological Sciences Journal*, 2015, 60(4): 549-565.

- [31] Bierkens M F P. Global hydrology 2015: State, trends, and directions. *Water Resources Research*, 2015, 51(7): 4923-4947.
- [32] Notter B, MacMillan L, Vivirol D, et al. Impacts of environmental change on water resources in the Mt. Kenya region. *Journal of Hydrology*, 2007, 343(3): 266-278.
- [33] Liu Changming, Li Daofeng, Tian Ying, et al. An application study of dem based distributed hydrological model on macroscale watershed. *Progress in Geography*, 2003, 22(5): 437-445. [刘昌明, 李道峰, 田英, 等. 基于DEM的分布式水文模型在大尺度流域应用研究. 地理科学进展, 2003, 22(5): 437-445.]
- [34] Arnell N W. A simple water balance model for the simulation of streamflow over a large geographic domain. *Journal of Hydrology*, 1999, 217(3): 314-335.
- [35] van Beek L P H, Wada Y, Bierkens M F P. Global monthly water stress: 1. Water balance and water availability. *Water Resources Research*, 2011, 47: W07517.
- [36] Bergström S, Graham L P. On the scale problem in hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 1998, 211(1): 253-265.
- [37] Su Fengge, Hao Zhenchun. Review of land-surface hydrological processes parameterization. *Advances in Earth Science*, 2001, 16(6): 795-801. [苏凤阁, 郝振纯. 陆面水文过程研究综述. 地球科学进展, 2001, 16(6): 795-801.]
- [38] Haddeland I, Clark D B, Franssen W, et al. Multimodel estimate of the global terrestrial water balance: Setup and first results. *Journal of Hydrometeorology*, 2011, 12(5): 869-884.
- [39] Liang X, Lettenmaier D P, Wood E F, et al. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1994, 99(D7): 14415-14428.
- [40] Hanasaki N, Kanae S, Oki T, et al. An integrated model for the assessment of global water resources: Part 1: Model description and input meteorological forcing. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2008, 12(4): 1007-1025.
- [41] Ragab R, Bromley J. IHMS-Integrated Hydrological Modelling System: Part 1. Hydrological processes and general structure. *Hydrological Processes*, 2010, 24(19): 2663-2680.
- [42] Kavvas M, Kure S, Chen Z, et al. WEHY-HCM for modeling interactive atmospheric-hydrologic processes at watershed scale. I: Model description. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2012, 18(10): 1262-1271.
- [43] Yu Z, Pollard D, Cheng L. On continental-scale hydrologic simulations with a coupled hydrologic model. *Journal of Hydrology*, 2006, 331(1): 110-124.
- [44] Xu Y P, Gao X, Zhu Q, et al. Coupling a regional climate model and a distributed hydrological model to assess future water resources in Jinhua River Basin, East China. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2014, 20(4): 04014054.
- [45] Kruk N S, Vendrame I F, Chou S C. Coupling a mesoscale atmospheric model with a distributed hydrological model applied to a watershed in Southeast Brazil. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2012, 18(1): 58-65.
- [46] Wilby R L, Wigley T. Precipitation predictors for downscaling: Observed and general circulation model relationships. *International Journal of Climatology*, 2000, 20(6): 641-661.
- [47] Peng Tao, Shen Tieyuan, Gao Yufang, et al. Research and application progress on basin hydro-meteorology coupling flood forecasting. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2014(2): 11. [彭涛, 沈铁元, 高玉芳, 等. 流域水文气象耦合的洪水预报研究及应用进展. 气象科技进展, 2014(2): 11.]
- [48] Yu Fan, Cao Ying. Research progress summarization of the impacts of global climate change to the regional water resources. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2008, 19(4): 92-97. [於凡, 曹颖. 全球气候变化对区域水资源影响研究进展综述. 水资源与水工程学报, 2008, 19(4): 92-97.]
- [49] Wagner S, Fersch B, Yuan F, et al. Fully coupled atmospheric-hydrological modeling at regional and long-term scales: Development, application, and analysis of WRF-HMS. *Water Resources Research*, 2016, 52(4): 3187-3211.
- [50] Senatore A, Mendicino G, Gochis D J, et al. Fully coupled atmosphere-hydrology simulations for the central Mediterranean: Impact of enhanced hydrological parameterization for short and long time scales. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2015, 7(4): 1693-1715.
- [51] Larsen M A D, Refsgaard J, Drews M, et al. Results from a full coupling of the HIRHAM regional climate model and the MIKE SHE hydrological model for a Danish catchment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, 18(11): 4733-4749.
- [52] Maxwell R M, Lundquist J K, Mirocha J D, et al. Development of a coupled groundwater-atmosphere model. *Monthly Weather Review*, 2011, 139(1): 96-116.
- [53] Shrestha P, Sulis M, Masbou M, et al. A scale-consistent terrestrial systems modeling platform based on COSMO, CLM, and ParFlow. *Monthly Weather Review*, 2014, 142(9): 3466-3483.
- [54] GregerSEN J, Gijsbers P, Westen S. OpenMI: Open modelling interface. *Journal of Hydroinformatics*, 2007, 9(3): 175-

- 191.
- [55] Fiorentini M, Orlandini S, Paniconi C. Control of coupling mass balance error in a process-based numerical model of surface-subsurface flow interaction. *Water Resources Research*, 2015, 51(7): 5698-5716.
 - [56] van Dijk A I, Gash J H, van Gorsel E, et al. Rainfall interception and the coupled surface water and energy balance. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 214: 402-415.
 - [57] Landman W A, Kgatuke M J, Mbedzi M, et al. Performance comparison of some dynamical and empirical downscaling methods for South Africa from a seasonal climate modelling perspective. *International Journal of Climatology*, 2009, 29 (11): 1535-1549.
 - [58] Chiew F, Kirono D, Kent D, et al. Comparison of runoff modelled using rainfall from different downscaling methods for historical and future climates. *Journal of Hydrology*, 2010, 387(1): 10-23.
 - [59] Bierkens M F P, Bell V A, Burek P, et al. Hyper-resolution global hydrological modelling: What is next? *Hydrological Processes*, 2015, 29(2): 310-320.
 - [60] Costa M H, Botta A, Cardille J A. Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins River, Southeastern Amazonia. *Journal of Hydrology*, 2003, 283(1): 206-217.
 - [61] Foley J A, DeFries R, Asner G P, et al. Global consequences of land use. *Science*, 2005, 309(5734): 570-574.
 - [62] Lawrence P J, Chase T N. Investigating the climate impacts of global land cover change in the community climate system model. *International Journal of Climatology*, 2010, 30(13): 2066-2087.
 - [63] Wang C, Wang Y Y, Wang P-F. Water quality modeling and pollution control for the eastern route of South to North Water Transfer Project in China. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 2006, 18(3): 253-261.
 - [64] Barnett T P, Pierce D W, Hidalgo H G, et al. Human-induced changes in the hydrology of the western United States. *Science*, 2008, 319(5866): 1080-1083.
 - [65] Luo S, Lü S, Zhang Y. Development and validation of the frozen soil parameterization scheme in Common Land Model. *Cold Regions Science and Technology*, 2009, 55(1): 130-140.
 - [66] Subin Z M, Riley W J, Mironov D. An improved lake model for climate simulations: Model structure, evaluation, and sensitivity analyses in CESM1. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2012, 4(1): M02001.
 - [67] Salamon P, Feyen L. Assessing parameter, precipitation, and predictive uncertainty in a distributed hydrological model using sequential data assimilation with the particle filter. *Journal of Hydrology*, 2009, 376(3): 428-442.
 - [68] Benke K K, Lowell K E, Hamilton A J. Parameter uncertainty, sensitivity analysis and prediction error in a water-balance hydrological model. *Mathematical and Computer Modelling*, 2008, 47(11): 1134-1149.
 - [69] Liu Y, Weerts A, Clark M, et al. Advancing data assimilation in operational hydrologic forecasting: Progresses, challenges, and emerging opportunities. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, 16(10): 3863-3887.
 - [70] Patil S D, Stieglitz M. Comparing spatial and temporal transferability of hydrological model parameters. *Journal of Hydrology*, 2015, 525: 409-417.
 - [71] Heuvelmans G, Muys B, Feyen J. Evaluation of hydrological model parameter transferability for simulating the impact of land use on catchment hydrology. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2004, 29(11): 739-747.
 - [72] Oubeidillah A A, Kao S- C, Ashfaq M, et al. A large-scale, high-resolution hydrological model parameter data set for climate change impact assessment for the conterminous US. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, 18(1): 67-84.
 - [73] Wood E F, Roundy J K, Troy T J, et al. Hyperresolution global land surface modeling: Meeting a grand challenge for monitoring Earth's terrestrial water. *Water Resources Research*, 2011, 47: W5301.
 - [74] Beven K, Cloke H, Pappenberger F, et al. Hyperresolution information and hyperresolution ignorance in modelling the hydrology of the land surface. *Science China: Earth Sciences*, 2014, 58(1): 25-35.
 - [75] Beven K J, Cloke H L. Comment on "Hyperresolution global land surface modeling: Meeting a grand challenge for monitoring Earth's terrestrial water" by Eric F. Wood et al. *Water Resources Research*, 2012, 48: W1801.
 - [76] Singh R S, Reager J T, Miller N L, et al. Toward hyper-resolution land-surface modeling: The effects of fine-scale topography and soil texture on CLM4.0 simulations over the Southwestern U.S. *Water Resources Research*, 2015, 51 (4): 2648-2667.

A review on the fully coupled atmosphere-hydrology simulations

ZHAN Chesheng¹, NING Like², ZOU Jing³, HAN Jian^{1,4}

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. Ministry of Education Key Laboratory for Earth System modeling, Department of Earth System Science, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. Institute of Oceanographic Instrumentation, Shandong Academy of Sciences, Qingdao 266001, Shandong, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Terrestrial hydrological process is an essential and very weak link in the global/regional climate models. In this paper, the development of research on the coupled atmosphere-hydrology simulations was analyzed, also the research trends and hotspots were identified by scientific literature analysis, and the challenges and opportunities in the coupled atmosphere-hydrology simulations are reviewed and summarized. The land surface processes in most of the existing climate models are mainly designed by the one-dimensional vertical structure, which lacks a detailed description of the two-dimensional hydrologic processes over specific basins, especially the parameterization of human activities on the underlying surface. In order to overcome the poor simulation on watershed hydrological processes derived by climate models, numerous studies were performed to investigate the feedbacks between hydrological processes and atmospheric processes, through coupling hydrological models with regional climate models. At present, improving the representation of hydrologic processes in land surface models and the development of global hydrological models have been the fundamental of investigating the feedbacks between terrestrial hydrology and atmosphere. Furthermore, the research on the coupling between hydrology and atmosphere has developed from the one-way coupling to the two-way coupling (also called fully coupled atmosphere-hydrology simulations). However, these studies on the fully coupled atmosphere-hydrology simulations were still immature and the fully coupled model needed further improvements, including further research on the matching methods of model coupling and system stability, research on effective scale transfer schemes, improvements on parameterization schemes and evaluation on parameter uncertainties, research on effective parameter transfer methods and improvements on regional applicability, as well as the coupled simulation of large-scale terrestrial hydrology and atmosphere at hyper-resolution with acceptable accuracy, and etc.

Keywords: land surface hydrology; regional climate model; fully coupled atmosphere-hydrology; water cycle; research review